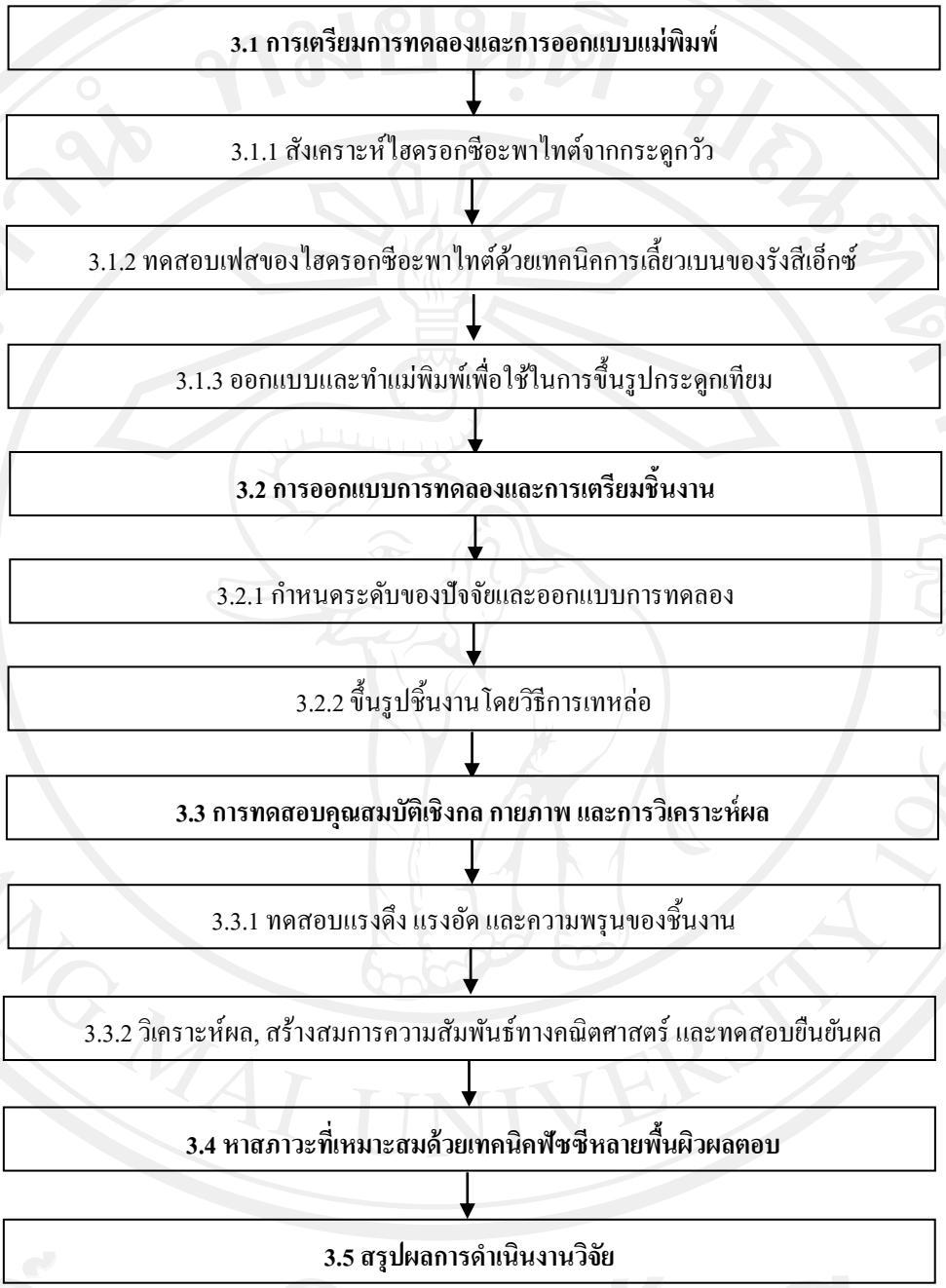
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปกระดูกเทียมที่ผลิตจากไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เตรียมได้จากกระดูกวัว กับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พอลิเมทิลเมทาไครเลตคอมโพสิท โดยศึกษาถึงอัตราส่วนผสมระหว่างไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และพอลิเมทิลเมทาไครเลต, เวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูป เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปกระดูกเทียมที่มีผลต่อผลตอบคือ ค่าการดึง ค่าการกดอัด และค่าความพรุน ด้วยวิธีการเทหล่อขึ้นรูปของชิ้นงาน สร้างสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล และเชิงกายภาพของชิ้นงาน รวมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปกระดูกเทียมด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองและเทคนิคฟัซซีแบบหลายผลตอบ โดยมีแนวทางในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.1

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย

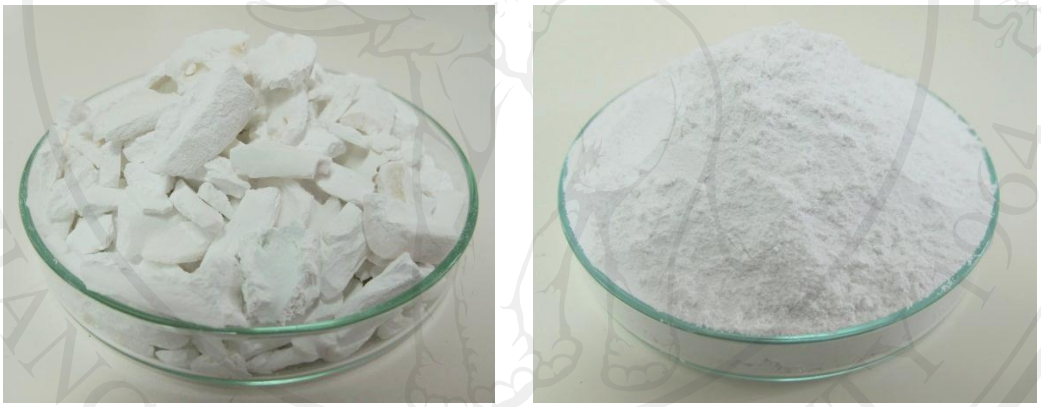
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.1 การเตรียมการทดลองและการออกแบบแม่พิมพ์

3.1.1 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว

1. นำกระดูกวัวมากำจัดโปรตีนและไขมันออก โดยการต้มกระดูกวัวเป็นระยะเวลา 5 วัน ใช้เวลาในการต้มวันละ 8 ชั่วโมง และเปลี่ยนน้ำที่ใช้ในการต้มทุกวัน หลังจากนั้นแช่กระดูกวัวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 50% ที่เจือจางด้วยน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1 : 2 โดยปริมาตร เป็นระยะเวลา 2 วัน และล้างกระดูกวัวก่อนนำมาอบให้แห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 ^{o}C นาน 1 วัน จากนั้นนำกระดูกที่ได้เผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 ^{o}C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

2. นำกระดูกวัวที่ผ่านการเผามาบดลดขนาด จากนั้นทำการบดแบบแห้งให้ละเอียด ด้วย Ball Milling เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำผงกระดูกที่ได้มาร่อนผ่านตะแกรงละเอียดขนาด 325 Mesh (ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 45 μm) ดังรูปที่ 3.2



(a) (b)

รูปที่ 3.2 (a) กระดูกวัวที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 ^{o}C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
(b) กระดูกวัวที่ผ่านการลดขนาดและร่อนผ่านตะแกรง

3.1.2 การทดสอบเฟสของไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD)

นำผงกระดูกที่ได้จากการเผาแคลไซน์มาทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อยืนยันว่ามีเฟสของไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยการระบุพีคของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งมีสูตรทางเคมีคือ $Ca_2(PO_4)_6(OH)_2$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

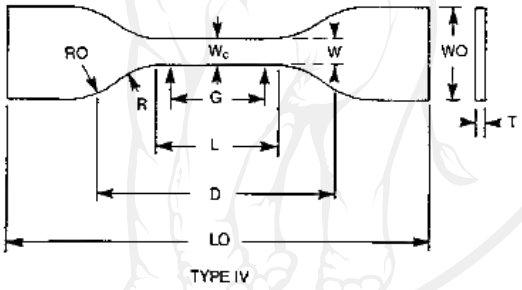
3.1.3 การออกแบบและการทำแม่พิมพ์

ออกแบบแม่พิมพ์ด้วยโปรแกรม Solid Work และทำแม่พิมพ์จากอลูมิเนียมด้วยเครื่องซีเอ็นซี (Computer Numerical Control: CNC) เพื่อใช้ในการขึ้นรูปกระดูกเทียมสำหรับการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล โดยทำแม่พิมพ์สำหรับการทดสอบดังนี้

3.1.3.1 แม่พิมพ์สำหรับการทดสอบแรงดึง (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics)

ขนาดตามมาตรฐาน ASTM D638-10 ชนิด (Type IV) ขนาดแสดงดังตารางที่ 3.1 รูปแบบแม่พิมพ์ที่ออกแบบเพื่อใช้ขึ้นรูปชิ้นงานแสดงในภาคผนวก รูปที่ ก1 และแม่พิมพ์สำเร็จที่ได้จากการกัดด้วยเครื่องซีเอ็นซีแสดงดังรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D638-10 ชนิด (Type IV)



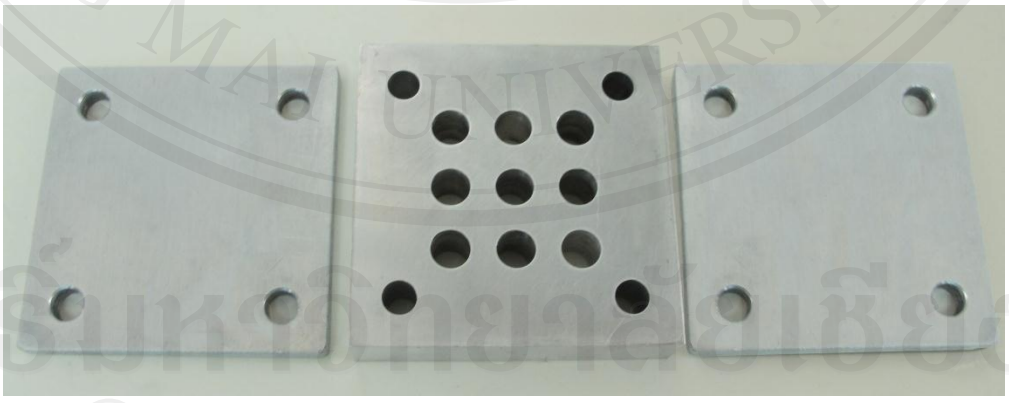
Specimen Dimensions for Thickness, T, mm (in.)		
Dimensions (see drawings)	4 (0.16) or under	Tolerances
	Type IV	
W-Width of narrow section	6 (0.25)	±0.5 (±0.02)
L-Length of narrow	33 (1.30)	±0.5 (±0.02)
WO-Width overall, min	19 (0.75)	+6.4 (+0.25)
LO- Length overall, min	115 (4.5)	no max
G-Gage Length	25 (1.00)	±0.13 (±0.005)
D-Distance between grips	65 (2.5)	±5 (±0.2)
R-Radius of fillet	14 (0.56)	±1 (±0.04)
RO-Outer radius	25 (1.00)	±1 (±0.04)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์สำเร็จที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง CNC

3.1.3.2 แม่พิมพ์สำหรับการทดสอบแรงอัด (Standard Specification for Acrylic Bone Cement)

รูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร สูง 12 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM F451-08 รูปแบบแม่พิมพ์ที่ออกแบบเพื่อใช้ขึ้นรูปชิ้นงานแสดงในภาคผนวก รูปที่ ก2 และแม่พิมพ์สำเร็จที่ได้จากการกัดด้วยเครื่องซีเอ็นซีแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แม่พิมพ์สำเร็จที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง CNC

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.2 การออกแบบการทดลองและการเตรียมชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้แบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนที่หนึ่งหาส่วนผสมของกระดูกเทียมที่เหมาะสม และขั้นตอนที่สอง หาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูปกระดูกเทียมจากส่วนผสมที่หาได้จากขั้นตอนที่หนึ่ง ที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลและความพรุน

3.2.1 การออกแบบการทดลอง

1 กำหนดระดับของปัจจัย

จากการศึกษาถึงปัจจัยผู้วิจัยให้ความสนใจว่าน่าจะมีผลต่อค่าการกดอัด ค่าการดึง และความพรุน มีทั้งหมด 5 ปัจจัย คืออัตราส่วนผสมของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พอลิเมทิลเมทาไครเลต ระยะเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูป (Polymerization) โดยทั้ง 5 ปัจจัยนี้ โดยผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัย ระดับขอบเขตของปัจจัยซึ่งประกอบด้วยระดับต่ำ/สูง และสัญลักษณ์ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงปัจจัย ระดับขอบเขตของปัจจัย และสัญลักษณ์สำหรับการทดลอง

ปัจจัย (หน่วย)	ระดับขอบเขตของปัจจัย		สัญลักษณ์
	ต่ำ (-)	สูง (+)	
1. อัตราส่วนผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว (%w/w)	10	55	(HA)
2. อัตราส่วนผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (%w/w)	40	80	(CMC)
3. อัตราส่วนผสมพอลิเมทิลเมทาไครเลต (%w/w)	5	10	(PMMA)
4. อุณหภูมิในการขึ้นรูป (องศาเซลเซียส)	70	100	(Temp)
5. ระยะเวลาในการขึ้นรูป (นาที)	20	45	(Time)

อัตราส่วนผสมของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว กำหนดระดับต่ำ-สูงขอบเขตของปัจจัยไว้ในช่วง 10 - 55% w/w กำหนดไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัวที่ 10% w/w เนื่องจากไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในกระดูก จึงต้องมีสารดังกล่าวอยู่ในวัสดุทดแทนกระดูก เพราะไฮดรอกซีอะพาไทต์มีคุณสมบัติในการเหนี่ยวนำกระดูก (Osseoconductive) สามารถเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวและการยึดติดกับเนื้อเยื่อได้ดี และเมื่อผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในอัตราส่วนที่มากกว่า 55% w/w พบว่าส่วนผสมเข้ากันยังไม่ทั่ว บางส่วนจับตัวกันเป็นก้อนและบางส่วนยังเป็นผง ไม่เหมาะสมในการนำมาเทหล่อขึ้นรูป

อัตราส่วนผสมของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส กำหนดระดับต่ำ-สูงขอบเขตของปัจจัยไว้ในช่วง 5 - 10% w/w เนื่องจากกระดูกเนื้อแน่นมีความพรุนประมาณ 5 - 10% การนำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมาเติมลงในส่วนผสมจะช่วยในการสร้างความพรุนให้แก่กระดูกเทียม เมื่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเกิดการสลายตัว

อัตราส่วนผสมของพอลิเมทิลเมทาไครเลต กำหนดระดับต่ำ-สูงขอบเขตของปัจจัยไว้ในช่วง 40 - 80% w/w เนื่องจากเมื่อลดปริมาณพอลิเมทิลเมทาไครเลตลงจะทำให้คุณสมบัติเชิงกลต่ำลง จึงกำหนดช่วงระดับต่ำของพอลิเมทิลเมทาไครเลตคือ 40% w/w และ (Deb, 2008) แนะนำปริมาณของพอลิเมทิลเมทาไครเลตที่เหมาะสมคือ 80% w/w

อุณหภูมิในการขึ้นรูป กำหนดระดับต่ำ-สูงขอบเขตของปัจจัยไว้ในช่วง 70-100 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิที่เหมาะสมในการให้ความร้อน (Polymerization) แก่ซีเมนต์กระดูกพอลิเมทิลเมทาไครเลตคือ 70-88 องศาเซลเซียส จึงกำหนดช่วงระดับต่ำของอุณหภูมิคือ 70 องศาเซลเซียส และซีเมนต์กระดูกพอลิเมทิลเมทาไครเลตจะยังคงสภาพ เมื่อให้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส และจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าในการให้อุณหภูมิในการขึ้นรูปกำหนดอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 100 องศาเซลเซียส จึงกำหนดช่วงระดับสูงของอุณหภูมิคือ 100 องศาเซลเซียส (Deb, 2008)

ระยะเวลาในการขึ้นรูป กำหนดระดับต่ำ-สูงขอบเขตของปัจจัยไว้ในช่วง 20-45 นาที เนื่องจากพอลิเมทิลเมทาไครเลตตามคู่มือการใช้งาน แนะนำระยะเวลาในการขึ้นรูปที่ 20 นาที (Lang Dental, 2012) และเมื่อให้เวลาที่น้อยกว่า 20 นาที ชิ้นงานยังแข็งตัวไม่ดีพอ จึงกำหนดช่วงระดับต่ำของเวลาคือ 20 นาที แต่เมื่อให้เวลาในการขึ้นรูปที่นานเกินกว่า 45 นาที พบว่าไม่สามารถนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ ทำให้เกิดการแตกหัก จึงกำหนดช่วงระดับสูงของเวลาคือ 45 นาที

2 ผลตอบของการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลตอบคือ คุณสมบัติเชิงกล และกายภาพ โดยการนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการเทหล่อมาทดสอบ เพื่อทำการวัดค่าการกดอัด การดึง และความพรุน

3 เลือกการออกแบบการทดลอง

ทำการออกแบบการทดลอง (Design of Experiments; DOE) โดยใช้หลักการของการออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM) เนื่องจากมีจำนวนปัจจัยทั้งหมด 5 ปัจจัย และจำนวนผลตอบจำนวน 3 ประเภทผลตอบ ผู้วิจัยจึงแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน เพื่อลดจำนวนการทดลองลงคือ หาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของกระดูกเทียมก่อนด้วยเทคนิคแบบ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ส่วนผสม (Mixture Design) เพื่อหาส่วนผสมของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พอลิเมทิลเมทาไครเลต ที่ใช้ในเป็นวัสดุทดแทนกระดูกที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด โดยกำหนดระดับปัจจัยของอัตราส่วนผสมตามตารางที่ 3.2 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ซึ่งมีจำนวนชุดการทดลองทั้งหมด 9 การทดลอง และทำการทดลองซ้ำ 1 ครั้ง จึงมีจำนวนชุดการทดลองทั้งหมด 18 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม เพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	HA	PMMA	CMC
3	1	0	1	0.3250	0.6000	0.0750
2	2	1	1	0.1500	0.8000	0.0500
8	3	-1	1	0.2125	0.7000	0.0875
7	4	-1	1	0.2375	0.7000	0.0625
1	5	1	1	0.5500	0.4000	0.0500
5	6	1	1	0.5000	0.4000	0.1000
4	7	-1	1	0.4125	0.5000	0.0875
6	8	1	1	0.1000	0.8000	0.1000
9	9	-1	1	0.4375	0.5000	0.0625

เมื่อได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมแล้วจึงนำอัตราส่วนผสมดังกล่าวมาหาสภาวะในการขึ้นรูปที่เหมาะสม ด้วยเทคนิคแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) ต่อเป็นขั้นตอนที่สอง เพื่อหาระยะเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูป (Polymerization) ที่เหมาะสมในการขึ้นรูปกระดูกเทียม โดยกำหนดระดับปัจจัยของระยะเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูปตามตารางที่ 3.2 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ซึ่งมีจำนวนชุดการทดลองทั้งหมด 9 การทดลอง และทำการทดลองซ้ำ 1 ครั้ง จึงมีจำนวนชุดการทดลองทั้งหมด 26 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.4

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 3.4 แสดงการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง เพื่อหาระยะเวลาและอุณหภูมิในการขึ้นรูป (Polymerization) ที่เหมาะสม

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Time	Temp
2	1	1	1	41	74
4	2	1	1	41	96
12	3	0	1	33	85
3	4	1	1	24	96
5	5	-1	1	20	85
11	6	0	1	33	85
13	7	0	1	33	85
10	8	0	1	33	85
6	9	-1	1	45	85
1	10	1	1	24	74
8	11	-1	1	33	100
9	12	0	1	33	85
7	13	-1	1	33	70

3.2.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน

ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานโดยวิธีการเทหล่อ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ชั่งน้ำหนักส่วนผสมทั้ง 3 ชนิดคือ ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และพอลิเมทิลเมทาไครเลต ในอัตราส่วน %w/w ที่แตกต่างกันตามที่ได้ออกแบบด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture Design)
- นำส่วนผสมทั้ง 3 ชนิด ผสมให้เข้ากันแล้วเติมเมทิลเมทาไครเลต (Methyl Methacrylate: MMA) ต่อพอลิเมทิลเมทาไครเลตในอัตราส่วน 1:1
- คนส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากันโดยใช้เวลาประมาณ 2 นาที
- เทส่วนผสมที่ได้ลงแม่พิมพ์ ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ (Polymerization) โดยนำแม่พิมพ์ไปต้มและควบคุมอุณหภูมิที่ 88^0 C นาน 20 นาที

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

- เมื่อให้ความร้อนครบ 20 นาทีแล้ว นำแม่พิมพ์ออกมาแช่น้ำเย็น
- ถอดชิ้นงานออกมาจากแม่พิมพ์ จะได้ชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 ชิ้นงานสำเร็จที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการเทหล่อ

เมื่อได้อัตราส่วนผสมของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และพอลิเมทิลเมทาไครเลต ที่ดีที่สุดต่อคุณสมบัติเชิงกลและความพรุนแล้ว ทำการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่ดีที่สุดต่อคุณสมบัติเชิงกลและความพรุน ด้วยวิธีการเดียวกัน

3.3 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล กายภาพ และการวิเคราะห์ผล

3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกล กายภาพ

3.3.1.1 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

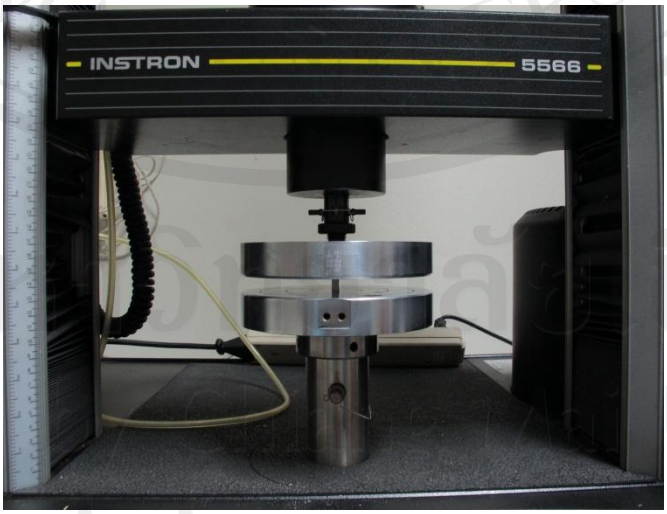
ทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D638-10 โดยนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการเทหล่อ เก็บที่อุณหภูมิ 22°C นานอย่างน้อย 24 ชั่วโมง กำหนด Speed of Testing 0.5 mm/min ปลายทั้งสองด้านของชิ้นงานถูกยึดด้วยหัวจับของเครื่องทดสอบ และให้แรงดึงในแนวแกนเคลื่อนออกจากกัน แสดงดังรูปที่ 3.6

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูปที่ 3.6 ทดสอบแรงดึงชิ้นงานด้วย Universal Tester

3.3.1.2 การทดสอบแรงอัด (Compression Test)

ทดสอบแรงอัดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM F451-08 โดยนำชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการเทหล่อ เก็บที่อุณหภูมิ 23 $\pm$ 2 ^{o}C และที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50 $\pm$ 10% RH นานอย่างน้อย 24 ชั่วโมง กำหนด Speed of Testing 5 mm/min วางชิ้นงานบนหัวทดสอบ และให้แรงอัดในแนวแกนเคลื่อนเข้าหากัน แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ทดสอบแรงกดอัดชิ้นงานด้วย Universal Tester

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.3.1.3 การทดสอบความพรุน (Porosity)

ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C373-88 (Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products) ด้วย Mettler Toledo Density Kit แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- นำชิ้นงานสำเร็จมาอบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง เพื่อหาน้ำหนักแห้งโดยการชั่งด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบ 4 ตำแหน่ง และบันทึกค่าน้ำหนักแห้งที่ได้ (D)
- นำชิ้นงานที่ผ่านการอบให้แห้งแล้วไปต้มด้วยน้ำกลั่นในบีกเกอร์ที่เดือดนาน 5 ชั่วโมง และแช่ชิ้นงานทิ้งไว้ในน้ำนาน 24 ชั่วโมง
- นำชิ้นงานที่ได้มาชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักขณะอิ่มตัวในน้ำ (S)
- หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาซับด้วยทิชชูให้แห้ง แล้วชั่งน้ำหนัก และบันทึกค่าน้ำหนักขณะอิ่มตัวในอากาศ (M)

รูปที่ 3.8 Mettler Toledo Density Kit สำหรับหาความพรุน

3.3.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ และการทดสอบยืนยันผล

การตรวจสอบรูปแบบเหมาะสมของรูปแบบจำลองภายหลังจากการเก็บรวบรวมข้อมูลจากการทดลองเสร็จสิ้น วิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปคือ Minitab เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลอง จากการหาค่าความผิดพลาดหรือความ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

คลาดเคลื่อนในการทดลอง (Experimental Error or Residual, e_{ij}) ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะสามารถทำได้ และรูปแบบสมการตัวแบบจะเหมาะสมเมื่อข้อสมมติทั้ง 4 นี้เป็นจริง

(1) ตรวจสอบข้อมูล หรือค่าผิดพลาด (ε) มีการกระจายแบบปกติ (Normal Distributed)

โดยตั้งสมมติฐานคือ μ_0 = ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ (3.1)

μ_1 = ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบไม่ปกติ (3.2)

(2) ตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดมีค่าเท่ากับศูนย์ หรือ $E(\varepsilon_{ij}) = 0$

โดยตั้งสมมติฐานคือ μ_0 = ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดมีค่าเท่ากับศูนย์ (3.3)

μ_1 = ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ (3.4)

(3) ตรวจสอบความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดคงที่แต่ไม่ทราบค่า (Constant Variance,σ^2) หรือ $V(\varepsilon_{ij}) = \sigma^2$

โดยตั้งสมมติฐานคือ μ_0 = ค่าความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดคงที่ (3.5)

μ_1 = ค่าความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดไม่คงที่ (3.6)

(4) ตรวจสอบค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independently Distributed) หรือ $Cov(\varepsilon_i,\varepsilon_j) = 0$

โดยตั้งสมมติฐานคือ μ_0 = ค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกัน (3.7)

μ_1 = ค่าความผิดพลาดมีไม่มีความเป็นอิสระต่อกัน (3.8)

การตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานโดยใช้เครื่องมือดังนี้ คือ กรณีตรวจสอบข้อสมมติที่(1)ใช้กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) กรณีตรวจสอบข้อสมมติที่(2), (3) และ (4) ใช้กราฟของค่าผิดพลาด (Residuals Plot)

1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ

ตรวจสอบข้อสมมติทางด้านการกระจายแบบปกติของข้อมูลที่ได้รับจากการทดลอง โดยใช้การพล๊อตความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าความผิดผลาด (Residuals) ถ้าข้อสมมติมีความถูกต้องกราฟควรมีลักษณะแนวโน้มเป็นเส้นตรง สามารถสรุปได้ว่าค่าผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ

2 การตรวจสอบความแปรปรวนที่คงที่

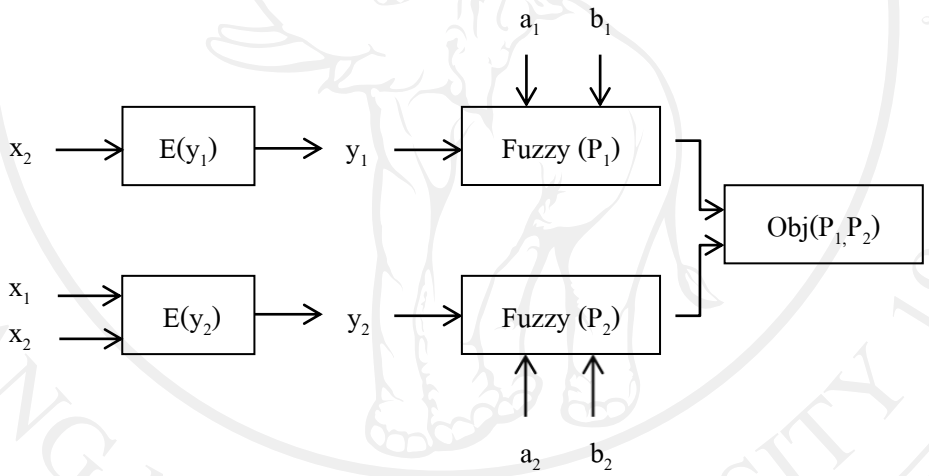
ตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ เป็นการพล๊อตระหว่างค่าความผิดผลาด (Residuals) กับค่าประมาณการทดลองที่ระดับ i ใดๆ ค่าความผิดพลาดดังกล่าวควรมีแนวโน้มที่มีการกระจายแบบสุ่ม (ไม่มีรูปแบบ) แสดงถึงความเป็นอิสระต่อกัน เมื่อพิจารณาที่ค่าประมาณการทดลองที่ระดับต่างๆ หากเกิดแนวโน้มของรูปทรง เช่น ลักษณะลำโพง แสดงว่าขัดแย้งกับข้อสมมติดังกล่าว คือความแปรปรวนไม่คงที่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ทำการขึ้นรูปชิ้นงานตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการหาโดยพื้นผิวผลตอบหลายตัว โดยทำการทดสอบยืนยันผลการทดสอบ 10 ชิ้นงานทดสอบ แล้วทำการวัดค่าการดึงของชิ้นงาน ค่าการกดอัดของชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูป และเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชิ้นงานโดยการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบในกระบวนการเทหล่อขึ้นรูป ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer

3.4 การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยเทคนิคฟัซซีหลายพื้นผิวผลตอบ

หาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัย เพื่อให้ได้ค่าพึงพอใจโดยรวม (Desirability) ที่ดีที่สุดของผลตอบ ด้วยวิธีฟัซซี โดยทำการวิเคราะห์ในโปรแกรม Matlab7 ซึ่งมีการป้อนข้อมูลเข้าโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการทำงานของฟัซซี

โดยที่ x_1 คือ เวลาในการขึ้นรูป
x_2 คือ อุณหภูมิในการขึ้นรูป
y_1 คือ ค่าผลตอบการดึงของชิ้นงาน
y_2 คือ ค่าผลตอบการกดอัดของชิ้นงาน
E(y_1) คือ สมการทำนายผลตอบการดึงของชิ้นงาน
E(y_2) คือ สมการทำนายผลตอบการกดอัดของชิ้นงาน
a_1 คือ ค่าผลตอบการดึงของชิ้นงานที่ต่ำสุด
b_1 คือ ค่าผลตอบการดึงของชิ้นงานที่สูงสุด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

a_2คือ ค่าผลตอบการกดอัดของชิ้นงานที่ต่ำสุด

b_2คือ ค่าผลตอบการกดอัดของชิ้นงานที่สูงสุด

Fuzzy (p_1) คือ ค่าที่ได้จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของการดึงของชิ้นงาน

Fuzzy (p_2) คือ ค่าที่ได้จากฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของการกดอัดของชิ้นงาน

Obj(p_1, p_2) คือ ค่าที่ได้จากสมการเป้าหมาย

3.5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนนี้เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้ และผลการวิเคราะห์จากขั้นตอนต่างๆ จากการใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองในการสร้างสมการทำนายค่าผลตอบและการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเทหล่อขึ้นรูปกระดูกเทียมจากผงไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว-คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส-พอลิเมทิลเมทาไครเลต

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved